УДК 553.411:550.83.02

ПЕТРОМАГНИТНАЯ И МИНЕРАЛОГИЧЕСКАЯ НЕОДНОРОДНОСТИ И ЗОЛОТОНОСНОСТЬ РУДНОЙ ЗОНЫ МЕСТОРОЖДЕНИЯ БЛАГОДАТНОГО

Ю.В. Колмаков, А.М. Сазонов*, А.Ю. Пинсон, Е.В. Потехина, И.Ф. Гертнер**, П.А. Тишин**

Томский политехнический университет
*Красноярская академия цветных металлов и золота
**Томский государственный университет
E-mail: gmr@prim.ce.cctpu.edu.ru

Приводятся данные по морфологии магнитных образований минерализованной зоны месторождения Благодатного Енисейского кряжа. Оценена их золотоносность. Охарактеризованы магнитные свойства пород и руд, включающих различные сульфидные ассоциации. Обосновывается в физико-химическом аспекте повышенная золотоносность руд, содержащих арсенопирит-пирротиновую ассоциацию.

В последнее время в практике эксплуатации золоторудных объектов всё большее значение приобретают месторождения малосульфидного рассеянного типа. Месторождение Благодатное является типичным представителем этого типа золотоносных руд. Ранее в Енисейском кряже поисковые работы не были нацелены на подобные объекты. Интерес к ним появился после получения Благодатным статуса месторождения. В этой связи представляется весьма актуальным рассмотрение магнитных свойств пород и руд месторождения как петрофизической основы геологической интерпретации данных магниторазведки при поисках его аналогов.

Геологическое строение и рудная минерализация месторождения Благодатного

Месторождение Благодатное расположено в центральной части Енисейского кряжа, в бассейне левых притоков верхнего течения р. Енашимо, в пределах юго-западного крыла Панимбинского антиклинория, где сосредоточена большая часть золоторудных месторождений региона.

Исследуемый объект приурочен к верхней части разреза кординской свиты нижнего рифея и представляет собой серию кулисообразных зон рассеянной сульфидной минерализации среди кристаллических сланцев эпидот-амфиболитовой фации. Оруденение контролируется крупным сбросо-сдвигом, наложенным на складчато-надвиговую Борзецовскую структуру и ориентированным под острым углом к её главным элементам. Рудные тела, оконтуренные по результатам рядового опробования, представляют собой цепочку крутопадающих (под углами от 65 до 70°) асимметричных линзовидных пластин северо-западного простирания, отделенных друг от друга участками пережимов. Морфология рудных тел во многом соответствует структурным ловушкам типа "*pull-apart*", раскрытие которых обусловлено левосторонним характером тектонического скольжения по криволинейной траектории плоскости сместителя.

Рудная минерализация представлена убогой сульфидной вкрапленностью в сланцах с резко подчиненным количеством маломощных кварцевых и флюорит-кварцевых жил и прожилков. При этом гидротермально-метасоматические преобразования вмещающих пород проявлены не контрастно. В качестве показателя интенсивности этих изменений может выступать только насыщенность сланцев кварцевыми жилами. По этому признаку от периферии к центру устанавливаются зоны, не несущие кварцевожильной минерализации, области с нитевидными кварцевыми прожилками и участки развития сближенных жил.

По составу сульфидов в пределах месторождения Благодатного выделяется 5 основных ассоциаций: пиритовая (пирит±халькопирит), пирит-пирротиновая (пирит+пирротин±халькопирит), пирротиновая (пирротин±халькопирит), арсенопирит-пирротиновая (арсенопирит+пирротин±пирит±халькопирит), сфалеритовая (сфалерит ±халькопирит±галенит), пространственное распределение которых отражает зональное строение рудоносно-минерализованной зоны (РМЗ). При этом, пиритовая ассоциация распространена среди пород околорудного пространства. Здесь и далее породами околорудного пространства, в отличие от просто вмещающих, названы породы, несущие сульфидную (преимущественно пиритовую) минерализацию, синхронную с минерализацией рудных тел. В периферийных частях РМЗ устанавливается пирит-пирротиновый парагенезис, который по направлению к центру сменяется пирротиновой и далее арсенопирит-пирротиновой ассоциациями. Важно отметить, что область развития последней практически полностью соответствует контурам рудного тела. Сфалеритовая минерализация проявляется локально, осложняя структуру общей зональности; она, как правило, пространственно сопряжена с проявлениями флюорита и носит наложенный характер [1].

По времени образования сульфидов в рудах месторождения выделены 3 генерации. Качественные составы первых двух практически не отличаются друг от друга и представлены пиритом, арсенопиритом, пирротином и халькопиритом. В третьей генерации к этим минералам добавляются сфалерит и галенит. Наибольшее количество сульфидов при-

ходится на долю второй генерации, с нею же связано и золото. Внутри этой генерации пирротин является более поздним минералом по отношению к пириту и арсенопириту. Халькопирит образует срастания и с арсенопиритом, и с пирротином.

Внутренняя структура магнитных образований минерализованной зоны

Измерения магнитной восприимчивости (χ) пород и руд минерализованной зоны проводились по керну разведочных скважин. Изучен керновый материал 28 скважин по 8 поисковым линиям (рис. 1). Суммарная длина скважин составляет 4725 м. На каждом метре кернового материала через равные промежутки было сделано минимум 3 измерения. В сильно дифференцированных по магнитной восприимчивости породах и рудах количество измерений увеличивалось до 4–5. Всего было выполнено 15870 измерений.

Первичная обработка материалов заключалась в построении скважинных графиков магнитной восприимчивости пород и руд минерализованной зоны. Эти графики послужили основой для построения петромагнитных разрезов по изученным поисковым линиям. В качестве коррелируемых подразделений в разрезах выступают петромагнитные разновидности пород и руд минерализованной зоны. Их выделение проводилось в следующей последовательности. Сначала разделили минерализованную зону на рудную часть и околорудное пространство. Во всех разрезах визуально прослеживаются поля распространения повышенно магнитных пород и руд, выполняющих внутренние части минерализованной зоны. Ее внешние части представлены слабо дифференцированными по магнитной восприимчивости породами с низкими значениями χ от 20 до $40 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ. Эти породы в дальнейшем рассматриваются как немагнитные. Практически повсеместно высокомагнитная рудная часть на графиках χ выделяется резкими ступенчатыми повышениями на фоне немагнитных пород. В тех случаях, когда переход немагнитные породы – магнитные образования не отмечается резким повышением магнитной восприимчивости, в качестве граничного значения χ между этими подразделениями была принята величина $40 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ. Эта величина принята граничной, поскольку является наибольшей для немагнитных пород в тех случаях, когда они сменяются магнитными с резким увеличением χ, и проведение границы между ними не вызывает затруднений. Золотоносные интервалы, как правило, приурочены к полям распространения пород и руд с аномально высокими

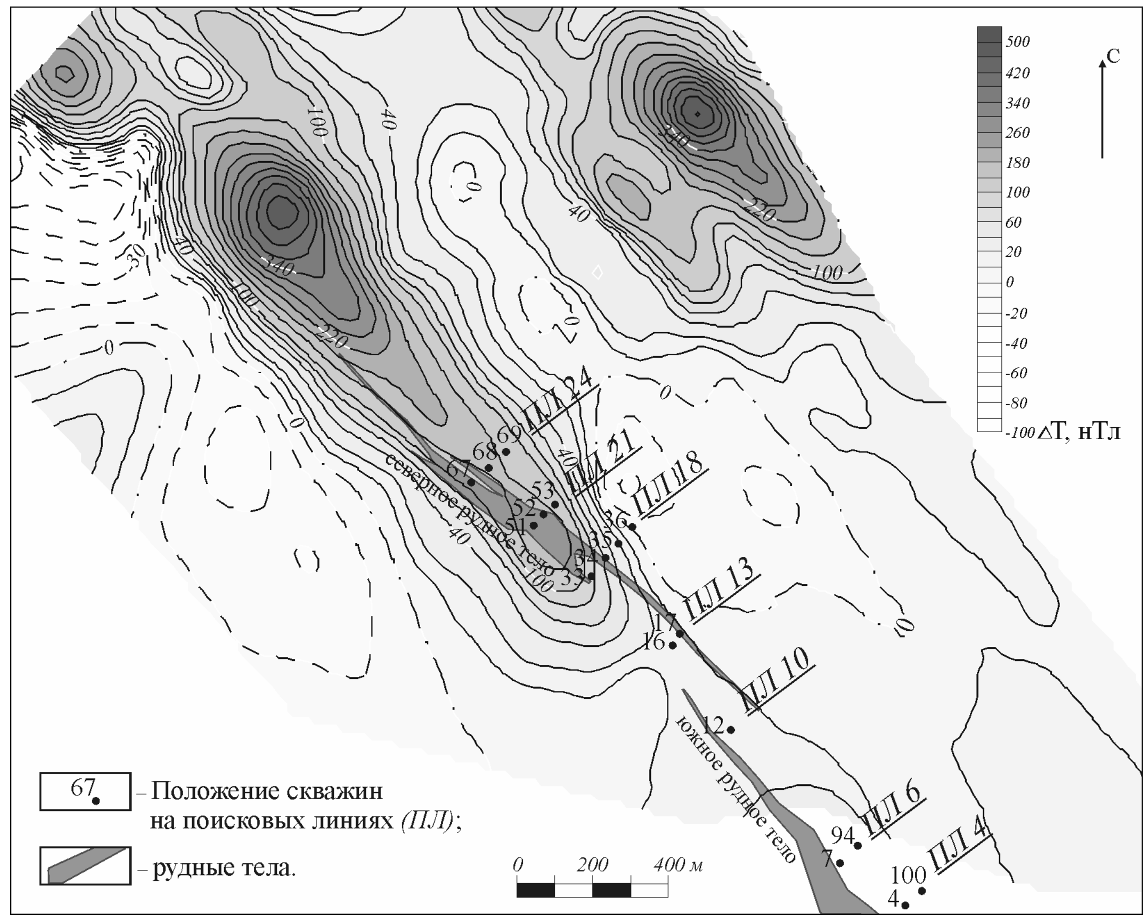


Рис. 1. *Магнитное поле минерализованной зоны (по материалам съёмки 1:25000 масштаба)*

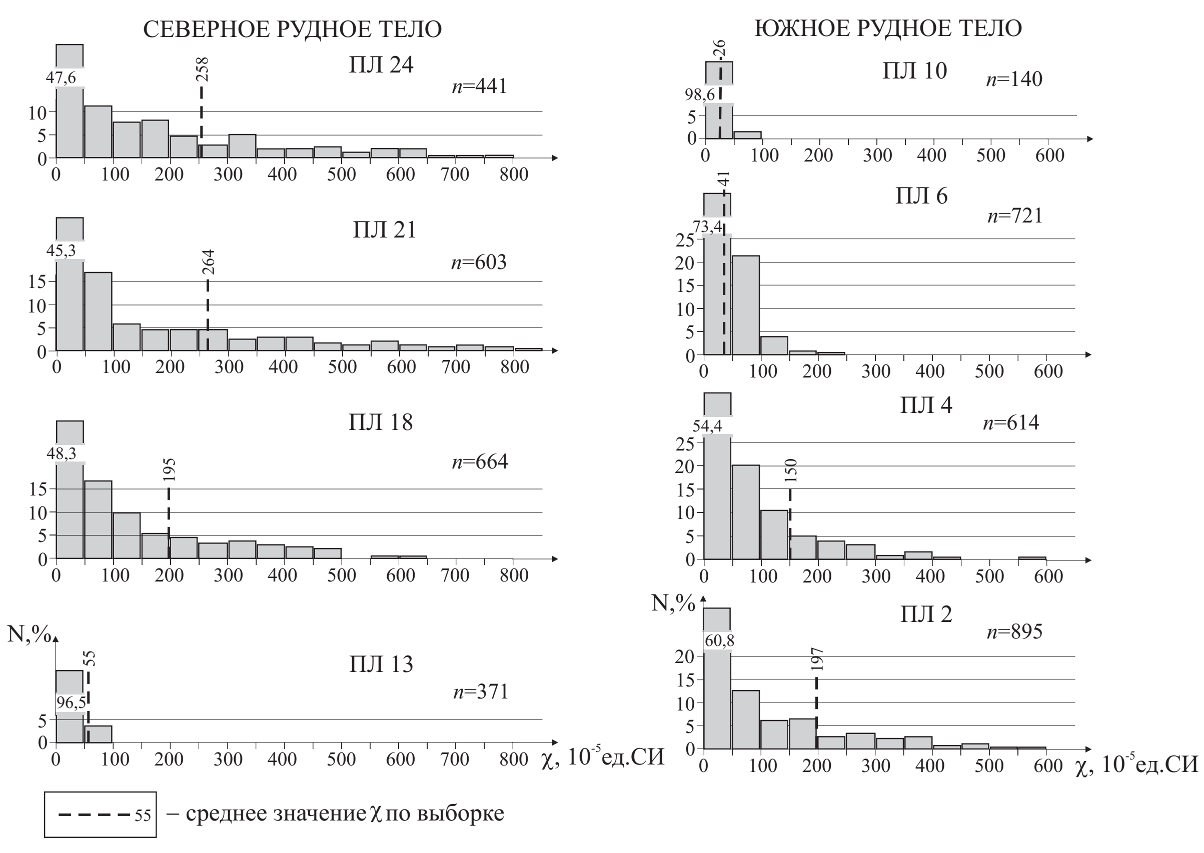


Рис. 2. *Полигоны распределения магнитной восприимчивости пород и руд минерализованной зоны, n – количество измерений*

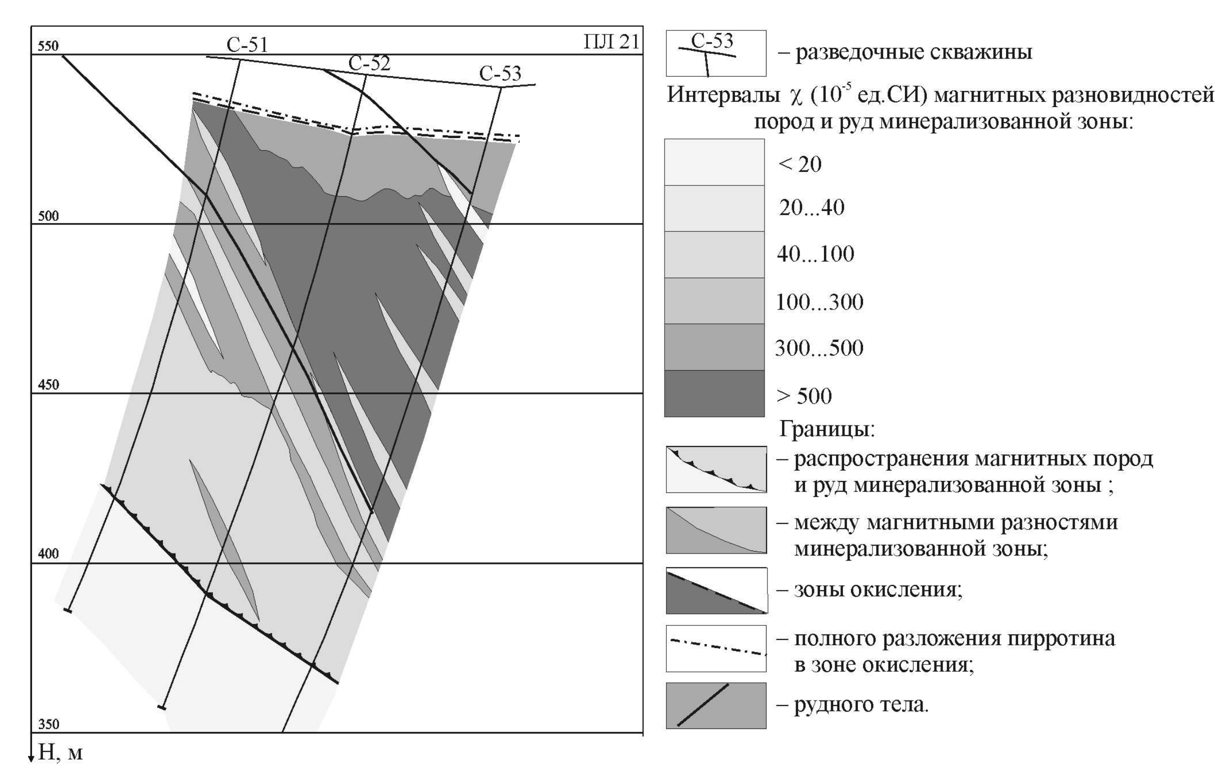


Рис. 3. *Петромагнитный разрез северного рудного тела*

значениями магнитной восприимчивости, что позволило объединить последние в рудную часть минерализованной зоны, а немагнитные образования внешней части – в породы околорудного пространства. Максимальные полигоны распределения χ свойственны рудной части в разрезах поисковых линий (ПЛ) 24, 21, 18 и 2, рис. 2.

Разрез поисковой линии 4 (рис. 1, 2) от перечисленных отличается тем, что здесь практически не встречаются магнитные образования со значениями χ больше $500 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ. Это позволило выделить породы с такими значениями χ в самостоятельную магнитную разновидность. При сравнении полигонов распределений магнитной восприимчивости руд в разрезах 6 и 4 поисковых линий выделена разновидность со значениями χ от 300 до $500 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ. Таким образом, было выделено 6 магнитных разновидностей пород и руд минерализованной зоны.

В качестве главного критерия, по которому коррелировались выделенные петромагнитные разновидности между отдельными скважинами, был принят угол падения плоскостей сланцеватости минерализованной зоны. Такой выбор основывался на результатах минералогических и структурных исследований рудной зоны по керну скважин. Установлено, что сульфидная и, в частности, пирротиновая минерализация развивалась преимущественно по плоскостям сланцеватости. Один из полученных разрезов приведён на рис. 3.

Судя по разрезам, магнитные тела представляют собой крутопадающие (под углами от 65 до 70°) выклинивающиеся пласты с переменной мощностью.

Генеральной чертой магнитной неоднородности минерализованной зоны является зональный характер структуры. Вертикальная зональность выражается в уменьшении χ пород и руд или доли вы-

Таблица 1. *Золотоносность петромагнитных образований минерализованной зоны*

Область распространения пород и руд с аномальными значениями χ					Околорудное пространство	
Магнитные разности ($\chi \cdot 10^5$ ед. СИ)	Содержание Au, г/т (распространенность, %)				$\chi_{min}...\chi_{max}$ / χ_{cp} 10^{-5} ед. СИ (кол-во знач.)	№ ПЛ (среднее содерж. Au, г/т)
	В целом по разрезу	В сланцах				
		без кварц-карбонатных образований	с кварцевыми жилами и прожилками	с нитевидными кварц-карбонатными прожилками		
<20	0,35(20,4)	0,35(10,2)	–	0,35(10,2)	13...27 / 20 (50)	ПЛ 24 (0,2)
20...40	0,52(8,7)	0,33(4,2)	–	0,69(4,5)		
40...100	1,39(17,7)	0,89(6,6)	–	1,69(11,1)		
100...300	1,29(30,3)	0,62(5,1)	–	1,43(25,2)		
300...500	1,71(14,7)	–	–	1,71(14,7)		
>500	2,01(8,7)	–	3,9(0,3)	1,95(8,4)		
<20	1,56(2,5)	1,34(1,8)	2,17(0,7)	–	28...68 / 41 (138)	ПЛ 21 (0,2)
20...40	0,75(10,6)	0,3(5,2)	1,57(2,7)	0,81(2,7)		
40...100	1,04(34,0)	0,7(6,8)	1,30(12,2)	0,75(15,0)		
100...300	1,25(24,4)	0,82(5,0)	0,96(10,4)	1,76(9,0)		
300...500	3,01(15,6)	1,24(1,2)	4,06(3,0)	2,92(11,4)		
>500	2,70(12,9)	–	2,57(1,4)	2,72(11,5)		
<20	0,63(2,5)	0,5(0,3)	1,3(0,6)	0,42(1,6)	4...57 / 30 (128)	ПЛ 18 (0,3)
20...40	0,39(11,2)	0,30(5,7)	0,49(4,7)	0,37(0,8)		
40...100	0,86(29,0)	0,58(9,3)	0,94(14,2)	1,10(5,5)		
100...300	2,16(34,1)	1,40(7,9)	2,26(20,7)	2,89(5,5)		
300...500	2,48(20,2)	1,80(5,5)	2,91(12,5)	1,71(2,2)		
>500	2,09(3,0)	0,83(0,8)	2,56(2,2)	–		
<20	–	–	–	–	18...40 / 29 (271)	ПЛ 13 (0,49)
20...40	0,41(14,7)	0,3(4,4)	–	0,46(10,3)		
40...100	1,98(85,3)	1,85(23,6)	–	2,03(61,7)		
20...40	0,57(15,0)	0,62(10,0)	0,61(1,3)	0,41(3,7)	17...66 / 30 (332)	ПЛ 6 (0,47)
40...100	2,19(74,0)	1,71(18,7)	2,58(28,5)	2,10(26,8)		
100...300	1,63(11,0)	1,78(3,3)	2,21(2,7)	1,22(5,0)		
<20	0,83(1,3)	0,83(1,3)	–	–	29...53 / 40 (51)	ПЛ 4 (0,2)
20...40	1,42(13,7)	0,86(6,2)	–	1,83(7,5)		
40...100	1,57(40,1)	0,95(15,3)	1,54(17,0)	2,86(7,8)		
100...300	2,32(40,4)	0,79(5,2)	2,98(21,2)	1,90(14,0)		
300...500	1,62(4,5)	0,82(0,3)	1,68(2,6)	1,67(1,6)		
<20	1,24(3,3)	1,44(0,8)	0,92(0,6)	1,26(1,9)	15...79 / 31 (357)	ПЛ 2 (0,62)
20...40	1,12(14,6)	0,66(4,7)	1,4(0,4)	1,34(9,4)		
40...100	2,65(32,2)	1,87(10,9)	3,95(4,9)	2,77(16,4)		
100...300	2,06(35,1)	1,82(11,7)	3,00(7,4)	1,79(16,0)		
300...500	2,4(13,7)	4,14(2,3)	2,90(5,4)	1,28(6,0)		
>500	2,01(1,2)	1,35(0,4)	–	2,34(0,8)		

сокомагнитных образований по восстанию минерализованной зоны. Вкрест простирания рудных тел наиболее магнитные образования тыловых зон сменяются менее магнитными фронтальных зон, за которыми далее следуют немагнитные породы околорудного пространства. По простиранию такая смена происходит в направлении выклинивания рудных тел. К неоднородностям меньшего порядка следует отнести часто встречающиеся (особенно в южной части рудной зоны) локальные проявления немагнитных пород и руд с мощностью 1...2, реже до 10 м среди магнитных. На отдельных участках распространенность этих проявлений бывает очень высокой, от чего графики магнитной восприимчивости приобретают пилообразный вид.

Золотоносность магнитных неоднородностей

Сопоставление магнитных разрезов с результатами сплошного опробования керна скважин на золото методом пробирного анализа позволяет утверждать, что в целом золотоносная часть минерализованной зоны контролируется образованиями с аномально высокой магнитной восприимчивостью. Немагнитные сульфидизированные породы на участке выклинивания рудных тел практически не несут золотой минерализации.

Результаты количественной оценки золотоносности магнитных образований приведены в табл. 1.

В северном рудном теле значимые содержания золота (2 г/т и выше) встречаются только в наиболее магнитных разновидностях и в большей мере среди тех, в которых проявлены кварцевые и карбонатные прожилки. В сланцах без кварц-карбонатного прожилкования обнаруживаются резкие снижения не только содержания золота, но и распространенности высокомагнитных разновидностей, которые свойственны данному участку рудного тела.

В южном рудном теле, как и в северном, золотая минерализация приурочена к магнитным сланцам с гидротермальными прожилками кварца и карбонатов. Для обоих рудных тел характерно, что при большем удалении от участка выклинивания, разделяющего их, происходит увеличение магнитной восприимчивости золотосодержащей части минерализованной зоны.

Таблица 2. *Объёмная доля руд (Au>2 г/т) в аномально магнитных образованиях минерализованной зоны ($\chi>40\cdot10^{-5}$ ед. СИ)*

Рудное тело	Северное				Зона выклинивания	Южное		
ПЛ	24	21	18	13	10	6	4	2
Доля, %	8,7	28,5	57,3	61,7	–	73,8	40,4	82,2

Качественная и количественная оценки золотоносности магнитных образований показывают наличие тесной связи между золотоносностью и магнитной восприимчивостью сланцев кординской свиты в пределах их минерализованной части. Характеристической особенностью руд является повышенная магнитная восприимчивость. В то же время в разных разрезах значительно варьирует доля руд в объеме выделенных магнитных образований. Особенно явно это прослеживается в северном рудном теле (табл. 2).

В северо-западном направлении в 150 м от 24 поисковой линии рудное тело выклинивается, но минерализованная зона, судя по магнитному полю, продолжается.

Магнитные характеристики сульфидных разновидностей пород и руд

Для того чтобы выяснить, почему золотоносны преимущественно самые магнитные образования и в чем причина латеральной изменчивости соотношений их размеров с размерами рудных интервалов, было проведено специализированное целенаправленное изучение χ пород и руд в зависимости от их вещественного состава.

В связи с тем, что магнетита в породах и рудах не обнаружено, магнитная восприимчивость может выступать мерой качественной (больше-меньше) оценки содержания моноклинного пирротина [2]. Поэтому в работе всегда подразумевается, что повышение магнитной восприимчивости пород связано с увеличением содержания пирротина.

При анализе результатов петрофизических исследований сначала рассматривались магнитные восприимчивости сульфидных разновидностей в общей коллекции, вне зависимости от их пространственного положения в рудных телах, а затем — зональность магнитных свойств отдельных сульфидных подразделений. Магнитные свойства сульфидных разновидностей минерализованной зоны отражены в табл. 3.

Таблица 3. *Магнитная восприимчивость пород и руд с различной сульфидной минерализацией*

Сульфидные ассоциации (количество образцов)	Распространенность руд (об. %) с различной магнитной восприимчивостью (10^{-5} ед. СИ)					
	<20	20...40	40...100	100...300	300...500	>500
Пиритовая (225)	28,44	56,03	14,20	1,33	–	–
Пирит-пирротиновая (218)	2,29	14,20	60,09	14,25	6,42	2,75
Пирротиновая (60)	5,00	6,67	38,33	41,67	8,33	–
Арсенопирит-пирротиновая (438)	0,65	1,78	10,14	49,08	26,48	11,87
Арсенопирит-пирротиновая +сфалеритовая (55)	1,82	7,27	72,73	18,18	–	–

Породы и руды, включающие в себя различные сульфидные ассоциации, образуют последовательный по возрастанию магнитной восприимчивости ряд: с пиритовой ассоциацией – пирит-пирроти-

новой – пирротиновой – арсенопирит-пирротиновой. При рассмотрении общих полигонов распределения χ руд различного сульфидного состава может сложиться впечатление о значительном совпадении магнитных свойств арсенопирит-пирротиновых разновидностей с пирротиновыми и пирит-пирротиновыми. Но в каждом отдельно рассматриваемом разрезе руды арсенопирит-пирротинового состава всегда уверенно выделяются по повышенным значениям χ (рис. 4). Их магнитная восприимчивость меняется согласованно с вариациями χ пород и руд всей рудной части минерализованной зоны. Уменьшение χ обусловлено снижением доли пирротина в ассоциации и нарастанием роли немагнитных сульфидов (арсенопирита, халькопирита, пирита) по восстанию и в направлении выклинивания рудных тел. Для того, чтобы проследить эти изменения выбирались интервалы без включений минералов более поздней сфалеритовой ассоциации, потому что появление этой ассоциации в рудах повсеместно приводит к изменению их магнитной восприимчивости (рис. 5).

Проявления сфалеритовой ассоциации чаще всего носят узко локальный, «струйный» характер. Присутствие минералов этой ассоциации в рудах приводит к некоторому общему понижению их магнитной восприимчивости и пилообразному облику графиков χ. Это объясняется растворением первичных пирротинов и образованием за их счет немагнитных сульфидов (пирита, халькопирита). Такие признаки можно считать диагностическими для измененных магнитных руд в результате наложения сфалеритовой минерализации.

Согласно представленным материалам и наблюдениям можно считать установленным фактом, что в пределах рудных тел самыми магнитными образованиями являются руды с арсенопирит-пирротиновой ассоциацией. Опираясь на это можно объяснить, почему в северном рудном теле в северо-западном направлении происходит уменьшение доли золотоносных интервалов до полного выклинивания рудного тела при общем повышении магнитной восприимчивости аномальной части минерализованной зоны.

На продолжении за участком выклинивания над минерализованной зоной наблюдается резкое увеличение амплитуд (от 140 нТл в пределах рудного тела до 300 нТл за его окончанием) магнитных аномалий (рис. 1). Такое увеличение нельзя объяснить разностью глубин залегания наиболее магнитных образований в рудном теле (здесь таковыми являются руды с арсенопирит-пирротиновой ассоциацией) и в указанной части минерализованной зоны, т.к. в разрезах поисковых линий 21 и 24 самые магнитные разновидности выходят на дневную поверхность. Во внимание не принимается приповерхностная зона полного окисления сульфидов, которая во всем рассматриваемом интерва-

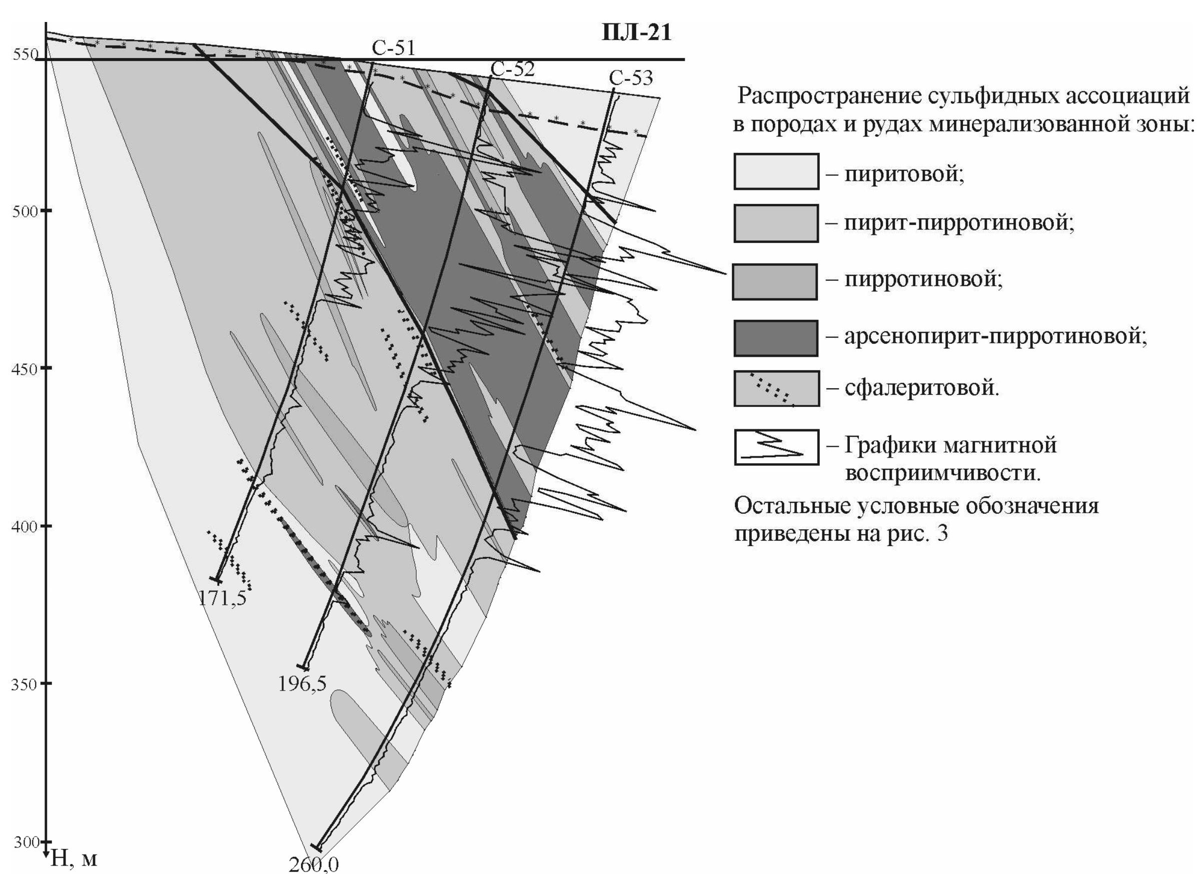


Рис. 4. *Отражение пород и руд различного сульфидного состава на графиках магнитной восприимчивости*

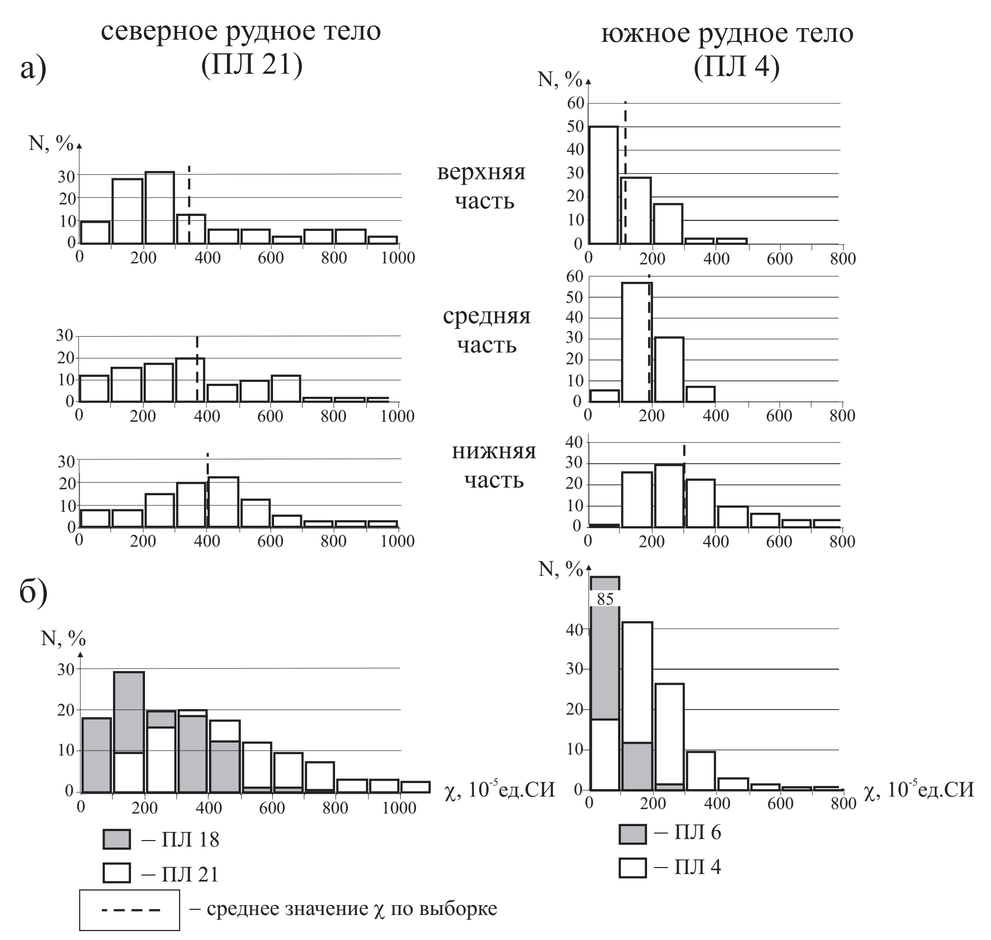


Рис. 5. *Изменение магнитной восприимчивости руд арсенопирит-пирротиновой ассоциации по: а) восстанию и б) простиранию*

ле примерно одинакова и составляет 13...15 м. Остается предположить, что ступенчатое увеличение амплитуды магнитной аномалии обусловлено качественным изменением сульфидной минерализации, а именно преобладанием пирротина над другими сульфидами. В работе [3], где рассматривается природа естественных электрических аномалий месторождения, говорится, что особенностью локализации этой части минерализованной зоны является обуглероженность вмещающих пород. Появление углеродистого вещества в гидротермальной системе приводит к снижению её окислительно-восстановительного потенциала Eh [4]. В работах [4–6] установлено, что образование пирита, арсенопирита или пирротина определяется величинами потенциалов pH и Eh гидротермальной системы. В этих координатах (pH – Eh) поля устойчивости пирита и арсенопирита практически совпадают, а их нижняя граница характеризуется равновесием с пирротином. Снижение потенциала Eh при прочих равных условиях приводит к расширению поля устойчивости пирротина и неустойчивости пирита и (или) арсенопирита. А.Л. Павлов показывает, что в гидротермальных растворах, содержащих продукты диссоциации сероводорода, миграция золота осуществляется в виде комплекса AuS^- [6]. При наличии в растворе кислородных комплексов мышьяка (мышьяковистой, метамышьяковистой кислот и продуктов их диссоциации) поле совместного выпадения золота с арсенопиритом в координатах pH – Eh совпадает с полем устойчивости комплекса AuS^-. Для появления парагенезиса золото+арсенопирит необходимо двухвалентное железо, которое может быть получено при взаимодействии растворов с вмещающими породами. Приводится реакция образования парагенезиса [6]:

$$FeAsS+Au+3OH^-=AuS^-+H_3AsO_3+Fe^{+2}+4e^-$$

Устойчивому состоянию пирротина в этих же координатах отвечают более восстановительные условия. Поля пирротина и комплекса AuS^- разделены между собой полем самородного золота и поэтому делается вывод, что появление парагенезиса золото+пирротин маловероятно.

Таким образом, основываясь на данных магниторазведки и сведениях по физико-химическим условиям отложения золота и сульфидов в гидротермальных системах, можно заключить, что северо-западное выклинивание северного рудного тела происходит на границе раздела сульфидных зон арсенопирит-пирротинового (с пиритом и халькопиритом) и преимущественно пирротинового состава.

Выводы

- Минерализованная зона месторождения Благодатного по магнитной восприимчивости контрастно разделяется на рудную часть и породы околорудного пространства. Рудная часть имеет аномальный облик с зональной структурой пространственного изменения магнитных свойств на фоне слабо дифференцированных, немагнитных пород околорудного пространства.
- Магнитная зональность минерализованных неоднородностей выражается в снижении магнитной восприимчивости пород и руд: вертикальная – по восстанию рудных тел; по простиранию – в направлении участка выклинивания; вкрест простирания – от центра к периферии.
- Породы и руды, содержащие различные сульфидные ассоциации, отличаются величиной магнитной восприимчивости. Наименьшие значения свойственны образованиям с пиритовой ассоциацией, за ними по мере возрастания магнитной восприимчивости следуют породы с пирит-пирротиновой, пирротиновой и арсенопирит-пирротиновой ассоциациями.
- Повышенная золотоносность контролируется наиболее магнитными образованиями, представляющими собой руды с арсенопирит-пирротиновой ассоциацией. Необходимо учитывать, что при сохранении аномально магнитного характера руд во всех разрезах их χ существенно меняется согласно общей магнитной зональности минерализованной зоны.
- Наиболее магнитные образования золотоносны преимущественно тогда, когда они развиты среди сланцев со сближенными кварцевыми жилами и прожилками и с нитевидными кварц-карбонатными прожилками. Золотоносность магнитных аналогов, но среди сланцев без кварцевой и карбонатной минерализации, заметно снижается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сазонов А.М., Звягина Е.А., Леонтьев С.И. и др. Генезис золотоносных руд горы Благодатной // Состояние и проблемы геологической изученности недр и минерально-сырьевой базы Красноярского края: Матер. Всеросс. научн. конф. – Красноярск, 2003. – С. 247–249.
2. Колмаков Ю.В., Пинсон А.Ю., Сазонов А.М. и др. Природа аномалий естественного электрического поля Благодатного золотопроявления (Енисейский кряж) // Геофизические методы при разведке недр и экологических исследованиях: Матер. Всеросс. научно-техн. конф., посв. 100-летию со дня рождения Д.С. Микова – основателя Сибирской школы геофизиков. – Томск, 2003. – С. 218–223.
3. Петрофизика / Под ред. Г.С. Вахромеева. – Томск: Изд-во ТГУ, 1997. – 462 с.
4. Осетров О.А. Сульфидные месторождения цветных металлов в сланцевых толщах. – М.: Недра, 1978. – 207 с.
5. Гаррелс Р.М., Крайст Ч.Л. Растворы, минералы, равновесия. – М.: Мир, 1968. – 368 с.
6. Павлов Л.А., Павлова Л.К. Элементы термодинамики поведения золота в процессе рудообразования // Физика и физикохимия рудообразующих процессов / Под ред. Г.Л. Поспелова. – Новосибирск: Наука, 1971. – С. 121–147.